干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

贺兰山东麓暴雨气候特征及灾害防御对策

李晓虹[1,2,3]， 苏占胜[1,2,4]， 纳 丽[1,2,4]， 陈豫英[1,2]， 陈彦虎[3]， 吴保国[4]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750000；
2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏 银川 750000；3. 宁夏石嘴山市气象局，宁夏 石嘴山 753000；
4. 宁夏气象服务中心，宁夏 银川 750000）

摘 要：利用贺兰山东麓9个常规站及287个自动气象站汛期（5—9月）逐小时降水量资料，应用线性趋势系数、克里金插值及Morlet小波变换等方法，分析了该地区的暴雨时空特征和振荡周期。结果表明：（1）贺兰山东麓暴雨日数20世纪60年代最多，暴雨强度20世纪70年代最强，暴雨贡献率2011—2019年最大。（2）1961—2019年年平均暴雨日数为2.1 d，暴雨强度为46.6 $mm\cdot d^{-1}$。（3）1961—2019年暴雨日数有2.1 $d\cdot(10a)^{-1}$的下降趋势，暴雨强度变化不大，暴雨贡献率有1% $\cdot(10a)^{-1}$的弱上升趋势。（4）暴雨主要出现在7月和8月，集中出现在7月中旬至8月中旬。（5）贺兰山东麓各站不同时间段共出现短时强降水810次，主要出现在夜间21:00—22:00和白天16:00，其中夜间暴雨占57.8%。（6）暴雨日数存在2~6 a、7~15 a的周期性变化，变化的第一主周期为3 a，暴雨强度存在2~4 a、5~16 a的周期变化，变化的第一主周期为9 a。（7）暴雨出现日数最多、强度最强、量级最大的区域主要分布在贺兰山银川至石嘴山段的沿山区域。（8）洪涝灾害具有发生频率高、涉及范围广，季节性明显、区域集中，破坏性强、造成损失大等特点。

关 键 词：暴雨；气候特征；时空特征；灾害防御；贺兰山东麓
文章编号：

贺兰山东麓位于黄河冲积平原和贺兰山冲积扇之间，西面是贺兰山脉，东临黄河，自古以来，贺兰山东麓的平原地区便有“塞上江南”的美誉。贺兰山东麓是公认的世界上适宜栽植酿酒葡萄和酿制葡萄酒的黄金地带，2019年酿酒葡萄栽植面积3.8×10^4 hm^2，是我国酿酒葡萄集中种植最大的区域，年产葡萄酒1.2×10^8瓶，产值超过200×10^8元。由于受到天气系统及地形地貌等因素综合影响，每到汛期，贺兰山东麓强对流天气多发，造成局地短时暴雨，并引发山洪灾害，对人民生命财产安全、农业产业发展以及生态环境保护等造成严重影响[1-2]。为科学防御和减轻气象灾害损失，有必要分析贺兰山东麓暴雨时空特征，有针对性的制定灾害防御对策。

国内外对于暴雨的研究分析较多[3-6]，张丽花等[7]、李海燕等[8]、钱莉等[9]、程肖侠等[10]分别对山西、鄂东、河西走廊、陕西等地暴雨进行了特征分析。有些学者对西北地区的暴雨气候特征进行了分析，林纾等[11]分析了1960年以来西北地区的暴雨时空变化特征，说明西北地区暴雨具有东多西少的特征；杨金虎等[12]统计了西北地区近45 a逐年汛期出现极端降水事件的频次，并分析了时空分布特征；张智等[13]分析了河套地区暴雨日数时空变化特征及气候规律，表明暴雨日数呈“东南多、西北少”的空间特征。纪晓玲等[14]对2006年7月14日贺兰山东麓的极值暴雨过程进行了分析，表明非地转湿Q矢量和强降水落区的对应关系；陈豫英等[15]分析了2016年8月21日夜间贺兰山东麓特大暴雨天气

收稿日期：2020-11-25； **修订日期**：2021-04-15
基金项目：国家自然科学基金项目（41965001）；中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室2019年度指令性科研项目（CAMP-201919）
作者简介：李晓虹（1987-），女，工程师，主要从事天气预报与气象服务研究. E-mail: 290141608@qq.com
通讯作者：苏占胜（1966-），男，正高级工程师，主要从事决策气象服务等方面研究. E-mail: 66407667@qq.com

过程的成因，研究了重大预报误差的缘由和可预报性；崔洋等[16]分析了贺兰山银川段不同重现期山洪灾害风险的分布特征。之前学者对贺兰山东麓暴雨的研究主要是从天气学成因方面进行分析，气候特征方面的研究还相对较少，本文对暴雨时空特征及洪涝灾害防御进行研究，以期为趋利避害等工作提供决策服务和参考依据。

1 研究区概况

本文研究区域是贺兰山东麓（图1），位于黄河冲积平原和贺兰山冲积扇之间，西面是贺兰山脉，东临黄河，包含石嘴山市、银川与吴忠市西部区域。该地区干旱少雨，蒸发量大，光照充足，积温高；具有葡萄生长和栽培的自然环境优势，西部贺兰山天然屏障抵挡寒流，东部有黄河形成气候调节功能。温湿度、水热系数等气候指标均在葡萄适宜种植区的范围。

2 资料与方法

2.1 资料来源

本文所用资料包括：贺兰山东麓9个常规自动气象站（青铜峡、永宁、银川、贺兰、大武口、石炭井、平罗、惠农、贺兰山）1961—2019年5—9月逐小时降水观测资料，贺兰山东麓记录完整的287个区域自动气象站2010—2019年5—9月逐小时降水观测资料，来源于宁夏气象综合数据库，已经过质量控制；气象灾害数据来源于2001—2019年中国气象灾害年鉴。

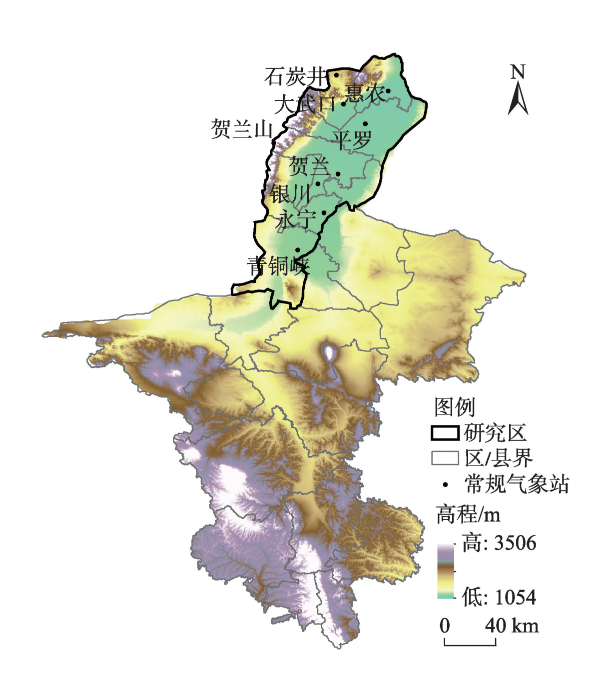


图1 贺兰山东麓9个常规气象站位置

Fig. 1 Location of the nine conventional meteorological stations along the eastern Helan Mountain

2.2 资料统计

（1）暴雨：按照中国气象局降水量标准，当12 h降水量≥30 mm或24 h降水量≥50 mm时为暴雨。（2）暴雨日数：统计时段内出现暴雨的天数，反映暴雨出现的多少。区域内暴雨日数为区域内每个观测站暴雨日数平均值（以下指标相同）。（3）暴雨降水量：统计时段内暴雨日降水量之和，反映暴雨的量级大小。（4）暴雨强度：统计时段内暴雨降水量与暴雨日数之比，反映暴雨的强弱程度。（5）暴雨贡献率：统计时段内暴雨降水量占总降水量的百分比，反映暴雨降水量在总降水量中的比重。（6）短时强降水：小时降水量≥20 mm。

2.3 小波分析

20世纪80年代初，Morlet提出时-频多分辨功能的小波分析方法（Wavelet analysis），给时间序列问题的研究提供了可能，它能清晰地展示时间序列中隐藏的多种变化周期，反映系统在不同时间尺度上的变化趋势，并能定性地估计系统未来的发展趋势[17]。目前，小波分析理论已广泛应用于大气科学领域。

小波分析基本思想是用一系列小波函数表示或逼近一种信号或函数。因此，小波函数是小波分析关键，它是一类具有震荡性的函数且能够快速衰减为零，即小波函数 $\psi(t)\in L^2(R)$ 且满足：

$$\int_{-\infty}^{\infty}\psi(t)\mathrm{d}t=0 \tag{1}$$

式中：t 为时间；$\psi(t)$ 为基小波函数，它可以通过时间轴上平移和尺度的伸缩构成一系列函数系：

$$\psi_{a,b}(t)=|a|^{-1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right),\quad a,\ b\in R,\ a\neq 0 \tag{2}$$

式中：$\psi_{a,b}(t)$ 为子小波；a 为尺度因子，表示小波周期的长度；b 为平移因子，表示时间上的平移。

若 $\psi_{a,b}(t)$ 是由（2）式给出的子小波，对给定能量的有限信号 $f(t)\in L^2(R)$，其中 $L^2(R)$ 为平方可积函数，其连续的小波变换为：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$W_f(a,b)$为小波变换系数；$f(t)$为一个信号或者平方可积函数；a为伸缩的尺度；b为平移的参数；$\bar{\psi}\left(\frac{x-b}{a}\right)$为$\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$的复共轭函数。大气研究中观测到的时间序列基本是离散的，设函数$f(k\Delta t)$，(k=1,2, …, N; Δt 为取样间隔)，则式(3)离散小波变换的形式为：

$$W_f(a,b)=|a|^{-1/2}\Delta t\sum_{k=1}^{N}f(k\Delta t)\bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t-b}{a}\right) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知小波分析的基本原理。在实际研究中，首先由小波变换方程得出小波系数，然后利用这些系数分析时间序列的时频特性。

由小波系数的平方在b域上积分，可得到小波方差，即

$$\mathrm{Var}(a)=\int_{-\infty}^{\infty}\left|W_f(a,b)\right|^2\mathrm{d}b \quad (5)$$

小波方差随尺度a变化的过程称为小波方差图。由式(5)可以得出，它能反映信号的波动能量在尺度a上的分布。因此，小波方差图可以确定不同尺度扰动的相对强度和主要时间尺度，即主周期。

3 结果与分析

3.1 暴雨时间变化特征

3.1.1 年代际变化 区域内暴雨的年代际变化中，暴雨日数在20世纪60年代最多(2.6 d·a^{-1})，其次是20世纪80年代(2.3 d·a^{-1})，2011—2019年暴雨日数为2.2 d·a^{-1}；暴雨强度在20世纪70年代最大(62.0 mm·d^{-1})，其次是2011—2019年(50.2 mm·d^{-1})；暴雨贡献率最大在2011—2019年(34.8%)，其次是20世纪70年代(32.6%)。近10 a来虽然暴雨日数不是最多，但暴雨强度强，暴雨贡献率大(表1)。

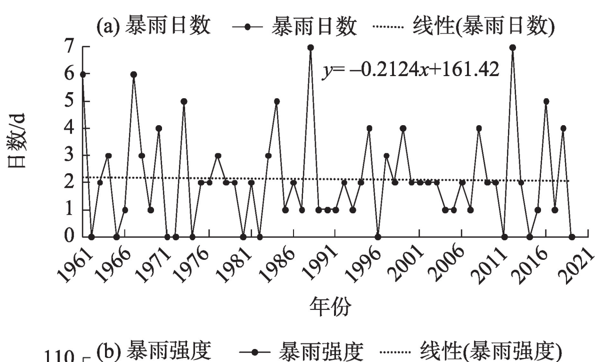
3.1.2 年际变化 从区域内暴雨日数的年际变化看，1961—2019年年平均暴雨日数为2.1 d，59 a中有48 a出现了暴雨，其中暴雨日数最多的年份是1988年和2012年，均达到了7 d；1961—2019年暴雨日数呈下降趋势，平均每10 a减少2.1 d(图2a)。

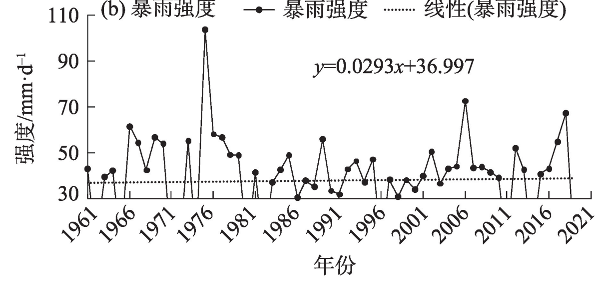
表1 暴雨的年代际变化

Tab. 1 Interdecadal changes of rainstorms

年代	暴雨日数/d·a^{-1}	暴雨强度/mm·d^{-1}	暴雨贡献率/%
1961—1970年	2.6	49.3	28.5
1971—1980年	1.6	62.0	32.6
1981—1990年	2.3	40.4	24.2
1991—2000年	2.1	38.6	26.1
2001—2010年	1.9	45.5	27.0
2011—2019年	2.2	50.2	34.8

从区域内暴雨强度的年际变化看，1961—2019年年平均暴雨强度为46.6 mm·d^{-1}，暴雨强度最强的年份是1975年，达103.8 mm·d^{-1}；1961—2019年暴雨强度变化不大，平均每10 a增加0.3 mm·d^{-1}(图2b)。





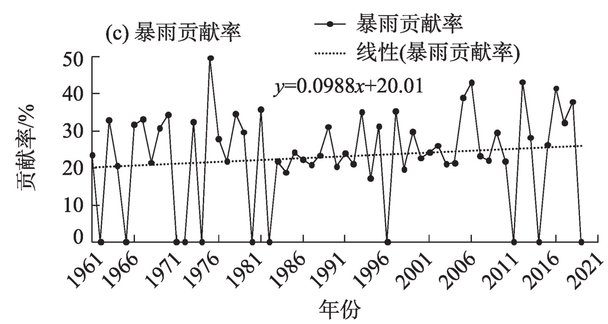


图2 暴雨的年际变化

Fig. 2 Interannual changes of rainstorms

从区域内暴雨贡献率的年际变化看，1961—2019年年平均暴雨贡献率为28%，暴雨贡献率最大的年份是1975年，为50%；1961—2019年暴雨贡献率平均每10 a增长1%，呈微弱上升趋势(图2c)。

虽然，1961—2019年贺兰山东麓暴雨日数呈下降趋势，但暴雨强度和贡献率有所上升，说明暴雨占总降水量的比重有所增加。

3.1.3 月际变化 区域内暴雨出现最早日期为5月3日(1967年贺兰山站)，最晚为9月20日(2005年平

罗站)；暴雨集中出现在7月和8月，期间平均暴雨日数为1.6 d·a^{-1}，占全年暴雨日数的76.8%。暴雨强度也是7月和8月最大，分别为49.8 mm·d^{-1}和48.4 mm·d^{-1}。暴雨贡献率为50.0%~57.8%，最大为9月，最小为5月(表2)。

3.1.4 旬际变化 区域内暴雨集中出现在7月中旬至8月中旬，暴雨日数占5—9月暴雨日数的59.2%，其中8月上旬和中旬暴雨日数最多，均为0.3 d·a^{-1}；暴雨强度8月上旬最强，达54.3 mm·d^{-1}，其次为7月中旬，为53.5 mm·d^{-1}(图3)。

表2 暴雨的月际变化

Tab. 2 Intermonthly changes of rainstorms

月份	暴雨日数/d·a^{-1}	暴雨强度/mm·d^{-1}	暴雨贡献率/%
5	0.12	33.6	50.0
6	0.22	42.5	58.6
7	0.78	49.8	56.3
8	0.85	48.4	55.6
9	0.15	38.0	57.8

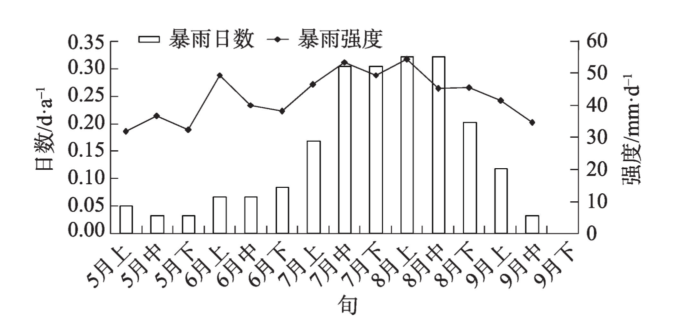


图3 暴雨的旬际变化

Fig. 3 Ten-day international changes of rainstorms

3.1.5 日变化 统计区域内9个常规自动气象站及287个区域自动气象站2010—2019年5—9月的小时降水资料，分析得出各站不同时间共出现短时强降水810次，夜间出现的频次高于白天，其中夜间468次，占57.8%。夜间21:00—22:00出现最多，为133次，占总次数的16.4%，可能与傍晚前后利于对流发展有关；其次为白天16:00，出现61次，占总次数的7.5%；再次为凌晨01:00，出现60次，占总次数的7.4%；上午09:00—10:00出现短时强降水最少，仅为17次，占总次数的2.1%(图4)。

3.2 暴雨空间分布特征

在ArcGIS系统中，应用克里金插值方法，将根据2010—2019年9个常规自动气象站及287个区域自动气象站资料统计出的暴雨日数、暴雨降水量、暴雨强度和暴雨贡献率进行空间插值，得到暴雨空间分布图。由图5可以看出，5—9月年均暴雨日数、暴雨降水量、暴雨强度和暴雨贡献率均为从西北向东南锐减，表现出明显的空间差异。暴雨出现日数最多、强度最强、量级最大的区域主要分布在贺兰山银川至石嘴山段沿山区域。2016年8月21日、2018年7月22日大暴雨均出现在贺兰山银川至石嘴山段，暴雨中心出现在贺兰山沿山一带，最大累计降水量均出现在贺兰山滑雪场，分别为239.5 mm和297.4 mm，引发洪水造成直接经济损失达2.9×10^8元和1.8×10^8元。由于在有力的环境场条件下，贺兰山强烈的地形抬升作用，使得该地区的降水增多[15]。暴雨强度的大值区除上述区域外，青铜峡市东南部及惠农区西部也较大；暴雨贡献率高值区除上述区域外，青铜峡市区、永宁县西北部、银川市区和平罗

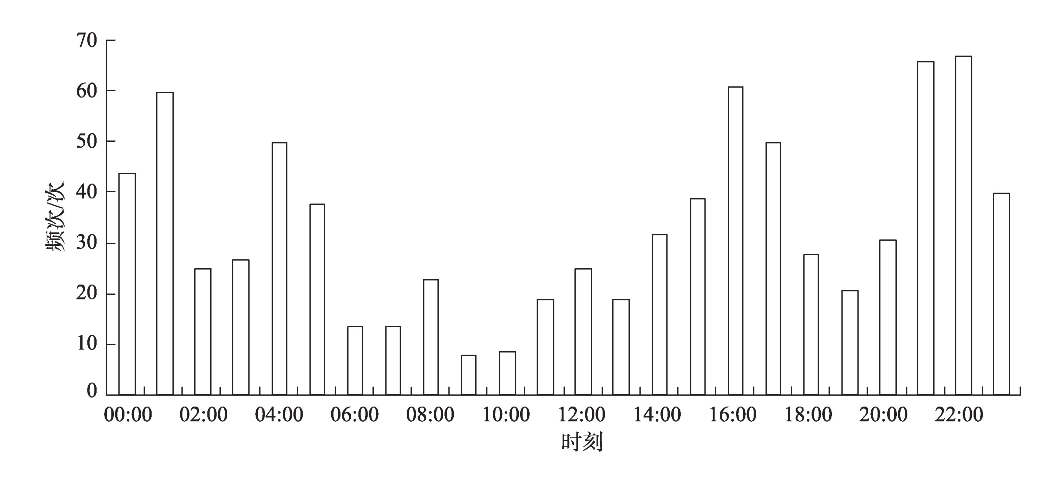


图4 短时强降水的时间变化

Fig. 4 Time variation of short-time strong rainfall

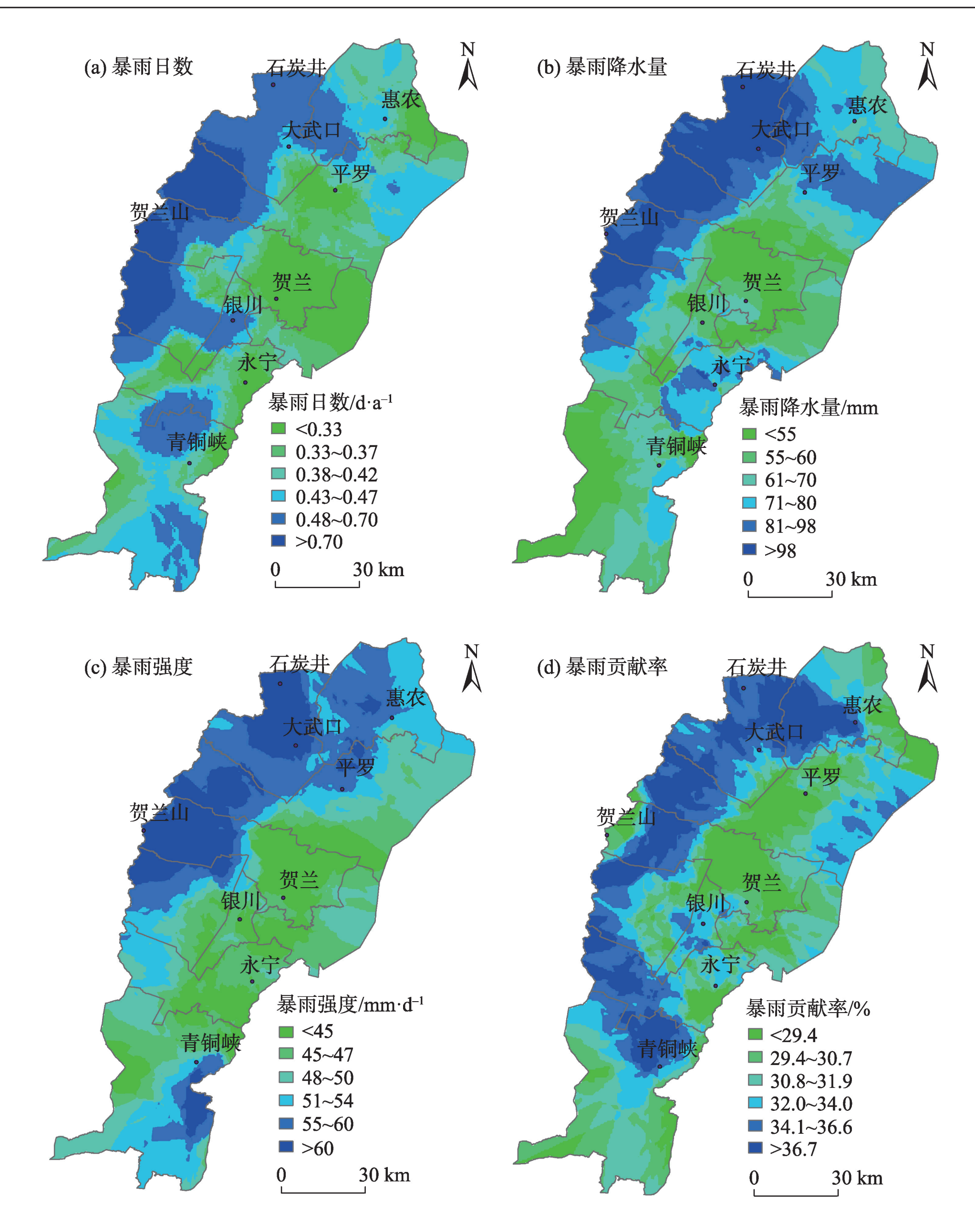


图5　暴雨空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of rainstorms

县东南部相对较高。

3.3　暴雨周期变化特征

利用计算出的1961—2019年逐年的暴雨日数和暴雨强度资料，应用小波分析法进行周期分析，绘制了小波系数的实部等值线图和方差图。小波系数的实部等值线图可以反映年暴雨日数和暴雨强度序列在不同时间尺度上的周期性变化及在时间域上的分布，进而判断不同时间尺度未来变化的趋势。小波方差图可以反映暴雨日数和暴雨强度的时间序列波动能量跟随尺度的变化，进而确定暴雨日数和暴雨强度演变过程中的主周期。

1961—2019年暴雨日数演化过程中存在2~6 a和7~15 a两类尺度的周期变化规律(图6a)。其中，在7~15 a尺度上出现了多–少交替的准5次震荡，且在整个时段表现的比较稳定，具有全域性；而2~6 a尺度的周期震荡不太稳定。暴雨日数的方差图中存在4个较为明显的峰值，它们依次对应着3 a、2 a、5 a、8~15 a的时间尺度；其中最大峰值对应着3 a的时间尺度，说明3 a左右的周期震荡最强，为暴雨日数变化的第一主周期。

1961—2019年暴雨强度演化过程中存在2~4 a和5~16 a两类尺度的周期变化规律(图6b)。其中，

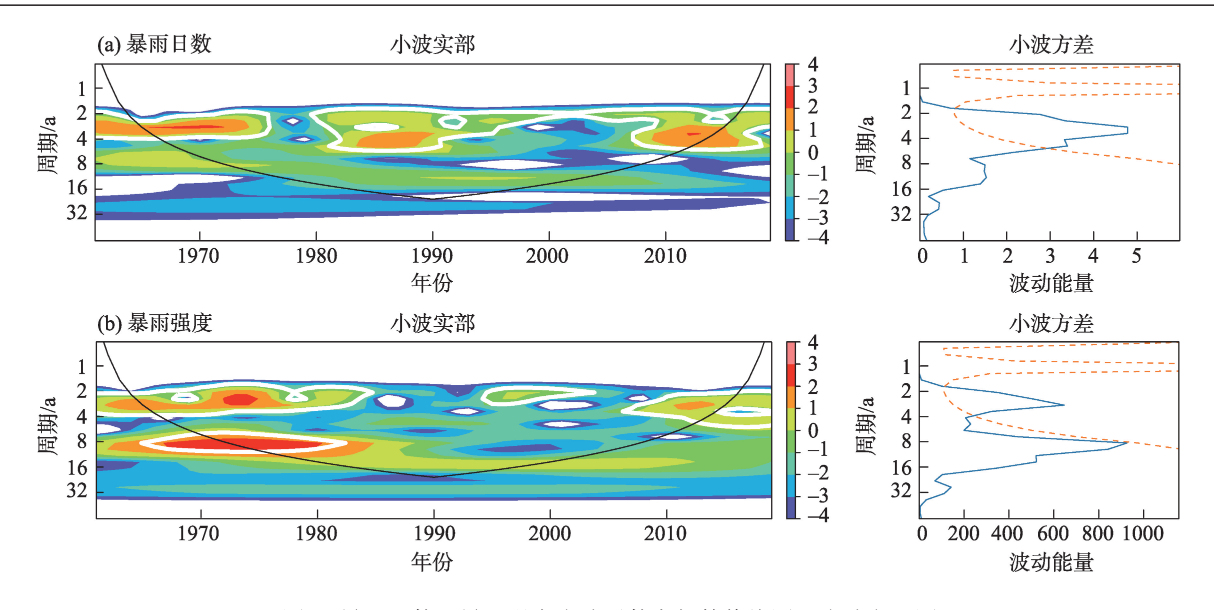


图6 暴雨日数和暴雨强度小波系数实部等值线图和小波方差图

Fig. 6 Real part contour map and wavelet square map of rainstorm days and rainstorm intensity

在5~16 a尺度上出现了强-弱交替的准3次震荡，且在整个时段表现的比较稳定；而2~4 a尺度的周期震荡在1995年之前和2005年之后较稳定。暴雨强度的方差图中存在3个较为明显的峰值，它们依次对应着9 a、3 a、14 a的时间尺度；其中最大峰值对应着9 a的时间尺度，说明9 a左右的周期震荡最强，为暴雨强度变化的第一主周期。

3.4 洪涝灾害特点及防御对策

3.4.1 ***洪涝灾害特点*** 受气候特征、地形及社会因素的影响，贺兰山东麓洪涝灾害具有发生频率高、涉及范围广，季节性明显、区域集中，破坏性强、造成损失大等特点。

（1）发生频率高、涉及范围广。2001—2019年共发生暴雨洪涝灾害50次，年均2.6次；灾害影响范围在3个县（区）以上的有22次，占44%；影响范围在6个县（区）以上的有6次，分别为2002年6月7—8日、2006年7月14日、2007年6月15—22日、2012年7月29—30日、2017年6月4—5日、2018年7月19—23日。

（2）季节性明显、区域集中。由表3可知，暴雨洪涝灾害发生时间主要在夏季，尤其是6—7月，占74.4%；发生地区主要在大武口区、平罗县、青铜峡市、贺兰县等地的沿山区域，由于地形影响，容易形成“管道效应”，有暴雨出现时，短时间内形成洪峰，容易出现洪涝灾害。另外，大武口区、平罗县、青铜峡市、贺兰县等地的沿山区域也是泥石流、崩塌等地质灾害高发区，而暴雨和短时强降水是触发地质灾害的主要诱因[18]。

（3）破坏性强、造成损失大。由于洪水与暴雨具有汇流时间短、来势凶猛、暴涨暴落特性，致使洪涝灾害的危害性、破坏性极强，造成损失较大。如2018年7月22—23日贺兰山银川至石嘴山段出现

表3 2001—2019年暴雨洪涝出现次数

Tab. 3 Number of rainstorms and floods from 2001 to 2019

月份	大武口区	惠农区	平罗县	银川市	永宁县	贺兰县	青铜峡市	合计	百分比/%
5	–	–	–	–	–	1	–	1	1.2
6	3	6	7	3	3	3	5	30	34.9
7	6	7	5	3	3	5	5	34	39.5
8	3	2	6	2	2	1	4	20	23.3
9	–	1	–	–	–	–	–	1	1.2
合计	12	16	18	8	8	10	14	86	–
百分比/%	14.0	18.6	20.9	9.3	9.3	11.6	16.3	–	–

大暴雨，局地百年一遇的特大暴雨，致使贺兰山大武口沟、汝箕沟、苏峪口沟、拜寺口沟等多条山洪沟暴发50~200 a一遇洪水，造成交通中断，受灾人口 1.7×10^4 人次，农作物受灾面积9802 hm^2，直接经济损失达 1.8×10^8 元。

3.4.2 暴雨洪涝灾害防御对策 贺兰山东麓暴雨日数、暴雨降水量、暴雨强度和暴雨贡献率均表现出明显的空间差异，暴雨出现日数最多、强度最强、量级最大的区域主要分布在贺兰山银川至石嘴山段沿山区域，而这一区域是泥石流、崩塌等地质灾害隐患点较为集中的区域，也是宁夏酿酒葡萄等特色产业以及旅游景区的集中分布区域，因此，需进一步加强暴雨洪涝灾害防御和工程及非工程措施，提高灾害应对能力。

（1）加强承灾能力建设。加强应对防范工程的系统性规范建设，因地制宜有针对性开展暴雨洪涝灾害防御工程规划建设，同时在工业、特色产业以及旅游景区规划建设中要充分考虑暴雨洪涝的空间分布特点，最大可能规避高风险区域，减轻灾害防御成本，增强防灾减灾能力。

（2）提高预报的准确性和及时性。要积极防范暴雨灾害的致灾因子危险性，深入分析暴雨的形成机理，挖掘其演变趋势；完善暴雨灾害的预报体系，利用气象卫星、雷达等遥感先进技术和设备，提高预报预测的准确性和及时性，重点关注暴雨高发时期和时段，加强监测预警和防范，争取暴雨灾害的防范时间。

（3）加强暴雨灾害应急能力。加强对重点区域内工业企业、酿酒葡萄庄园、旅游景区、城乡居民的气象灾害防御宣传，增强全民气象防灾减灾和避灾意识，避免和减轻灾害损失。

（4）促进生态保护。在做好暴雨山洪防范的同时，通过拦洪蓄水工程的规划建设，充分合理利用暴雨降水资源，促进生态保护与修复。

4 结 论

通过对贺兰山东麓暴雨的时空变化特征及洪涝灾害特点进行分析，得到以下结论：

（1）1961—2019年年平均暴雨日数为2.1 d；暴雨日数在20世纪60年代最多为2.6 $d\cdot a^{-1}$；1961—2019年暴雨日数呈下降趋势，平均每10 a减少2.1 d。

（2）1961—2019年年平均暴雨强度为46.6 $mm\cdot d^{-1}$；暴雨强度在20世纪70年代最大为62.0 $mm\cdot d^{-1}$；1961—2019年暴雨强度变化不大，平均每10 a增加0.3 $mm\cdot d^{-1}$。

（3）1961—2019年年平均暴雨贡献率为28%；2011—2019年暴雨贡献率最大为34.8%；1961—2019年暴雨贡献率平均每10 a增长1%，呈微弱的上升趋势。

（4）暴雨集中出现在7月和8月，主要在7月中旬至8月中旬，暴雨日数8月上旬和中旬最多，均为0.3 $d\cdot a^{-1}$，暴雨强度8月上旬最强，达54.3 $mm\cdot d^{-1}$。

（5）2010—2019年各站不同时间共出现短时强降水810次，夜间出现的频次高于白天，占57.8%；夜间21:00—22:00出现最多，其次为白天16:00。

（6）5—9月年均暴雨日数、暴雨降水量、暴雨强度和贡献率均表现出明显的空间差异，暴雨出现日数最多、强度最强、量级最大的区域主要分布在贺兰山银川至石嘴山段沿山区域。

（7）1961—2019年暴雨日数演化过程中存在2~6 a、7~15 a两类尺度的周期变化规律，变化的第一主周期为3 a；暴雨强度演化过程中存在2~4 a、5~16 a两类尺度的周期变化规律，变化的第一主周期为9 a。

（8）洪涝灾害主要发生在6—7月，具有发生频率高、涉及范围广、季节性明显、区域集中，破坏性强、造成损失大等特点。

参考文献（References）

[1] 岳发鹍. “8·21”贺兰山东麓特大暴雨洪水应对措施和思考[J]. 中国水利, 2017, 15: 49–51. [Yue Fakun. Mitigation measures for catastrophic rainstorm flood dated on August 21, 2016 in eastern foothill of Helan Mountain[J]. China Water Resources, 2017, 15: 49–51.]

[2] 任蓓. 宁夏贺兰山东麓“2006.7.14”暴雨洪水分析及减灾对策探讨[J]. 中国防汛抗旱, 2008(2): 25–27. [Ren Bei. Analysis of “2006. 7.14” rainstorm and flood at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia and countermeasures for disaster reduction[J]. China Flood and Drought Management, 2008(2): 25–27.]

[3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 33. [Tao Shiyan. Torrential rain in China[M]. Beijing: Science Press, 1980: 33.]

[4] 冯建民. 宁夏天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 74–75. [Feng Jianmin. Ningxia weather forecast manual[M]. Beijing: Meteorological Press, 2012: 74–75.]

[5] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed

changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D5): D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

[6] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456−1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456−1466.]

[7] 张丽花, 延军平, 陈利民. 近52年山西暴雨气候变化特征分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 142−148. [Zhang Lihua, Yan Junping, Chen Limin. Characteristic analysis of rainstorm climate change in Shanxi Province during recent 52 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(4): 142−148.]

[8] 李海燕, 陈国平, 陈光涛. 近40 a鄂东汛期暴雨日数的时空变化特征[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(1): 77−82. [Li Haiyan, Chen Guoping, Chen Guangtao. Spatio-temporal variation characteristics of the number of rainy days in the recent 40 a flood season in eastern Hubei Province[J]. Rainstorm Disaster, 2011, 30(1): 77−82.]

[9] 钱莉, 杨永龙, 张宇林, 等. 河西走廊东部极端降水的时空分布及影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 207−214. [Qian Li, Yang Yonglong, Zhang Yulin, et al. Temporal and spatial distribution and influence factors of extreme precipitation in eastern Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2): 207−214.]

[10] 程肖侠, 梁奇琛, 蔡新玲. 陕西省单站暴雨特征及评估方法[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 66−73. [Cheng Xiaoxia, Liang Qichen, Cai Xinling, et al. Characteristic analyses and procedure evaluation of rainstorm in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 66−73.]

[11] 林纾, 陆登荣, 王毅荣, 等. 1960年代以来西北地区暴雨气候变化特征[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 16−21. [Lin Shu, Lu Dengrong, Wang Yirong, et al. Climate change characteristics of rainstorms in northwest China since 1960's[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 16−21.]

[12] 杨金虎, 江志红, 杨启国, 等. 中国西北汛期极端降水事件分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 320−325. [Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Yang Qiguo, et al. Analysis on extreme precipitation event over the northwest China in flood season[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(2): 320−325.]

[13] 张智, 蔡敏. 河套地区暴雨的地域性特点及灾情分析[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 81−86. [Zhang Zhi, Cai Min. Regional characteristics and disaster analysis on rainstorms in Hetao[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 81−86.]

[14] 纪晓玲, 桑建人, 马筛艳, 等. 贺兰山东麓宁夏一次极值暴雨过程分析[J]. 气象科学, 2010, 30(3): 332−337. [Ji Xiaoling, Sang Jianren, Ma Shaiyan, et al. Analysis on a rainstorm occurred in the east region of Helan Mountain[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(3): 332−337.]

[15] 陈豫英, 陈楠, 任小芳, 等. 贺兰山东麓罕见特大暴雨的预报偏差和可预报性分析[J]. 气象, 2018, 44(1): 159−169. [Chen Yuying, Chen Nan, Ren Xiaofang, et al. Analysis on forecast deviation and predictability of a rare severe rainstorm along the eastern Helan Mountain[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(1): 159−169.]

[16] 崔洋, 常倬林, 左河疆, 等. 贺兰山银川段不同重现期山洪灾害风险与影响区划研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 859−870. [Cui Yang, Chang Zhuolin, Zuo Hejiang, et al. Risk and impact zoning of different return period flash flood disasters in Yinchuan section of Helan Mountain[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 859−870.]

[17] 王文圣, 丁晶, 李耀清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. [Wang Wensheng, Ding Jing, Li Yaoqing. Hydrology wavelet analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]

[18] 陈豫英, 赵光平, 王红英, 等. 宁夏地质灾害气象预报预警研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 81−86. [Chen Yuying, Zhao Guangping, Wang Hongying, et al. Study on meteorological forecast and early warning of geological disasters in Ningxia[J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 81−86.]

Climate characteristics of rainstorm and disaster prevention countermeasures along the eastern Helan Mountain

LI Xiaohong[1,2,3], SU Zhansheng[1,2,4], NA Li[1,2,4], CHEN Yuying[1,2], CHEN Yanhu[3], WU Baoguo[4]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750000, Ningxia, China; 2. Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750000, Ningxia, China; 3. Shizuishan Meteorological Observatory of Ningxia, Shizuishan 753000, Ningxia, China; 4. Ningxia Meteorological Service Center, Yinchuan 750000, Ningxia, China)

Abstract: Using the hourly precipitation data of nine conventional stations and 287 automatic weather stations during the flood season of May to September along the eastern Helan Mountain in Ningxia, China, the temporal and spatial characteristics and oscillation periods of the rainstorm were analyzed in this study using the linear trend coefficient, Kriging interpolation, and Morlet wavelet transform. First, we recorded the highest rainstorm days in the 1960s, intensity in the 1970s, and contribution rate from 2011 to 2019. Second, the average annual number of rainstorms along the eastern Helan Mountain from 1961 to 2019 was 2.1 d, and the rainstorm intensity was 46.6 mm·d^{-1}. Third, the number of rainstorm days showed a downward trend of 2.1 d·(10a)$^{-1}$, and the rainstorm intensity depicted a little change trend. The rainstorm contribution rate had a weak upward trend of 1%·(10a)$^{-1}$ from 1961 to 2019. Fourth, rainstorm mainly occurred in July and August, with more concentrated rains from mid-July to mid-August. Fifth, 810 short-term heavy precipitations were observed in different periods along the eastern Helan Mountain, which mainly occurred at 21:00—22:00 and 16:00. Accordingly, 57.8% of the rainstorms occurred at night. Sixth, the number of rainstorm days showed periodic changes of 2−6 a and 7−15 a, with the first main period of change being 3 a. Meanwhile, the rainstorm intensity depicted periodic changes of 2−4 a and 5−16 a, with the first main period of change being 9 a. Seventh, the area with the largest number of days, strongest intensity, and largest magnitude of rainstorm was mainly distributed in the mountain area of Yinchuan to Shizuishan of Helan Mountain. Lastly, the flood disaster along the eastern Helan Mountain was characterized by high frequency, wide range, obvious seasonality, regional concentration, strong destructivity, and great loss.

Key words: rainstorm; climate characteristics; the spatial and temporal characteristics; disaster prevention; the eastern Helan Mountain